

УДК 502/504:627.533:551.311

А. П. Русецкий, доктор техн. наук, доцент

Контактная информация: тел. 8 (0165) 35-95-24, e-mail: nimel@mail.ru

Республиканское унитарное предприятие «Институт мелиорации», Белоруссия

Н. Д. Станкевич, инженер-гидротехник

Контактная информация: тел. 8 (8162) 77-19-20

Открытое акционерное общество «Институт Новгородинжпроект», Великий Новгород

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВОВ-ПРОРЕЗЕЙ В ЗАТАПЛИВАЕМЫХ ПОЛЬДЕРАХ

Рассмотрен расчет скорости на гребнях водосливов-прорезей затапливаемых польдеров при их расположении в нижней поперечной дамбе. Получены зависимости для приближенного расчета динамики уровней в затапливаемом польдере и скоростей на гребне водослива-прорези в период половодья. Даны предложения по порядку проектирования затапливаемого польдера, устойчивого к размыву.

There is considered a calculation of velocity on the crests of spillway-weir – cutters of the flooded polders at their location on the bottom cross dike. There are obtained dependencies for an approximate calculation of the levels dynamics in the flooded polder and velocities on the spillway-weir – cutter crest in the period of flooding. There are given proposals on the order of designing a flooded polder resistant to washing.

В период пропуска половодья гребни дамб и водосливов-прорезей затапливаемых польдеров подвержены воздействию скорости воды, в ряде случаев превышающей допустимые нормы, из-за чего происходят размывы и разрушения участков ограждений [1, 2]. Для снижения скорости на гребнях водосливов-прорезей и дамб в затапливаемых польдерах предусматриваются следующие мероприятия: а) предварительное затопление через водовпуски в ограждающих сооружениях; б) подбор длины водосливов-прорезей, позволяющих создавать небольшие перепады уровней у ограждений. Задачи расчета глубины затопления польдера и скорости в периоды подъема и спада половодья в общем виде приведены в работах [1, 3]. Эти расчеты сложные, требуют использования методов решения дифференциальных уравнений. Авторами рассмотрена задача более простого способа обоснования параметров отверстий водовпусков и водосливов-прорезей затапливаемых польдеров, обеспечивающих устойчивость к размыву в периоды пропуска половодья.

Задача: пропуск половодья через польдер, имеющий прямоугольную форму в плане и примыкающий продольной стороной к незатапливаемой дамбе. В польдере имеется водослив-прорезь и донная труба-водовпуск, расположенные в нижней поперечной дамбе. Водовпуск к началу половодья открыт и остается в таком состоянии в периоды затопления и освобождения польдера от воды. Задача проектирования включает: а) проверку гребней ограждений на размыв и б) при несоблюдении условия устойчивости подбор конструкции, не допускающей размывающих скоростей.

Общий период затопления польдера, в зависимости от характера и расходов течения, разделим на четыре периода: первый — течение только через водовпуск, второй — течение через водовпуск и неподтопленное через водослив-прорезь, третий — течение через водовпуск и подтопленное через водослив-прорезь, четвертое — течение через водовпуск, водослив-прорезь и гребни дамб.

Вначале следует определить глубину затопления польдера к моменту подъема уровней на пойме до отметки

гребня водослива-прорези — первый период. Для удобства расчета отсчеты глубин будем производить от линии, проходящей по поверхности почвы на польдере и совпадающей со средним уклоном поймы на этом участке.

Расход течения через водовпускное отверстие в любой момент времени определяется уравнением

$$Q_{\text{тр}} = \mu\omega\sqrt{2g(H-h)}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{тр}}$ — расход водовпускных труб; μ — коэффициент расхода водовпусков; ω — общая площадь отверстий водовпусков; H — глубина воды на пойме; h — глубина воды в польдере у водовпускных сооружений; g — ускорение свободного падения.

Изменение объема воды в польдере за элементарный промежуток времени dt составит:

$$Q_{\text{тр}} dt = \Omega(h)dh, \quad (2)$$

где t — время; $\Omega(h)$ — площадь затопления в польдере.

Уравнение (2) с учетом зависимости (1) принимает следующий вид:

$$\mu\omega\sqrt{2g(H-h)}dt = \Omega(h)dh. \quad (3)$$

Глубина воды в пойме для любого момента времени определяется по расчетному гидрографу уровней, составленному в соответствии с реальными гидрологическими данными:

$$H = f(t). \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (3) и зависимость (4) в пределах времени от t до t_1 позволяют получить динамику уровней воды в польдере в этот период, в том числе глубину воды в польдере в начале затопления через гребень водослива-прорези.

Задача определения глубины воды в начале перелива через водослив-прорезь с помощью уравнений (3) и (4) не имеет строгого теоретического решения. Для условий, когда глубина воды в польдере изменяется линейно по времени $H = at$, можно воспользоваться способом, изложенным в [1]. В общем случае развития половодья, когда $H = f(t)$ изменяется нелинейно, можно применить приближенный способ расчета пошагового решения с интервалами $\Delta t = t_2 - t_1$, представив урав-

нение (3) в виде

$$(t_2 - t_1)\mu\omega\sqrt{2g}\sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} = \Omega(h)(h_2 - h_1), \quad (5)$$

где t_1 и t_2 — время в начале и в конце каждого шага решения соответственно; H_1 и H_2 — уровни воды на пойме соответственно в начале и в конце каждого шага решения; h_1 и h_2 — уровни воды в польдере соответственно в начале и в конце каждого шага решения.

Когда уровень подъема воды в польдере достигнет отметки гребня водослива-прорези, дальнейший подъем уровня воды на пойме приведет к затоплению польдера одновременно через водовпускное сооружение и водослив-прорезь. Течение воды через водослив-прорезь во втором периоде будет неподтопленным. Наиболее опасное по устойчивости к размыву сечение находится в месте перехода порога водослива-прорези в низовой откос, где глубина равна критической, определяемой уравнением [4]

$$h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (6)$$

где $h_{\text{кр}}$ — критическая глубина на водослив-прорези; α — коэффициент кинематической энергии; q — удельный расход водослива-прорези; g — ускорение свободного падения.

Второй период продолжается с момента начала перелива воды через гребень водослива-прорези до подъема глубины в польдере выше порога на величину

$$\Delta_{\text{п}} = h_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где $\Delta_{\text{п}}$ — глубина выше порога водослива-прорези.

При изменяющемся уровне на пойме удельный расход и критическая глубина также будут зависимыми от времени. При подъеме уровня на пойме глубина в польдере может расти быстрее, чем на самой пойме; в этом случае условие (7) будет достигнуто, а второй период будет иметь конечный срок.

Уравнение баланса объема воды в польдере для второго периода имеет следующий вид:

$$dt(Q_{\text{тр}} + Q_{\text{в}}) = \Omega(h)dh, \quad (8)$$

где $Q_{\text{в}}$ — расход притока через водослив-прорезь.

Расход неподтопленного водослива-прорези

$$Q_B = m_{\Pi} b_{\Pi} \sqrt{2g} (H - P)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

где m_{Π} — коэффициент расхода водослива-прорези [1]; b_{Π} — длина водослива-прорези в нижней дамбе; P — высота порога водослива-прорези.

С учетом расходов водовпускного сооружения по (1) и водослива-прорези по (9) уравнение (8) принимает следующий вид:

$$dt \left[\mu \omega \sqrt{2g} (H - h) + m_{\Pi} b_{\Pi} \sqrt{2g} (H - P)^{\frac{3}{2}} \right] = \Omega(h) dh. \quad (10)$$

Для расчета в конечных разностях во втором периоде уравнение (10) приводим к такому виду:

$$(t_2 - t_1) \left[\mu \omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + m_{\Pi} b_{\Pi} \sqrt{2g} \left(\frac{H_1 + H_2}{2} - P \right)^{\frac{3}{2}} \right] = \Omega(h) (h_2 - h_1). \quad (11)$$

По уравнению (11) устанавливаем глубину на пойме H_2 в конце свободного течения через водослив-прорезь. Максимальную скорость течения воды в наиболее опасном сечении водослива-прорези определяем по формуле

$$v = \varphi_{\kappa} \sqrt{2g (H_2 - P - h_{\text{кр}})}. \quad (12)$$

Третий период затопления происходит в течение времени, которое соответствует изменению глубины в польдере от $h = P + h_{\text{кр}}$ до высоты дамбы $P_{\text{д}}$. Уравнение баланса для третьего периода соответствует уравнению (8), расход водослива-прорези определяем по формуле

$$Q_B = \varphi_{\kappa} b_{\Pi} (h - P) \sqrt{2g} \sqrt{(H - h)}, \quad (13)$$

где φ_{κ} — коэффициент скорости водослива-прорези [1].

Подставим в уравнение (8) расходы $Q_{\text{тр}}$ из (1) и водослива-прорези из (13), получим дифференциальное уравнение для третьего периода:

$$dt \left[\mu \omega \sqrt{2g} (H - h) + \varphi_{\kappa} b_{\Pi} (h - P) \sqrt{2g} \sqrt{(H - h)} \right] = \Omega(h) dh. \quad (14)$$

Уравнение (14) приводим в конечных разностях к следующему виду:

$$(t_2 - t_1) \left[\mu \omega \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} + \varphi_{\kappa} b_{\Pi} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - P \right) \sqrt{2g} \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2}} \right] = \Omega(h) (h_2 - h_1). \quad (15)$$

Используя уравнение (15) и гидрограф уровней (4), устанавливаем глубину в польдере h_2 при глубине на пойме $H_2 = P_{\text{д}}$. Скорость течения на гребне водослива-прорези

$$v = \varphi_{\kappa} \sqrt{2g (H_2 - h_2)}. \quad (16)$$

В четвертом периоде уровень воды в польдере вначале установится горизонтально по гребню нижней поперечной дамбы. При повышении горизонта на пойме за некоторое время польдер заполнится водой полностью. В начале заполнения польдера водой в четвертом периоде течение будет неподтопленным. Объем воды, накапливающийся в польдере за четвертый период, определяем так:

$$W_1 = \int_0^{H_{\text{д}}} Q dt = \int_0^{H_{\text{д}}} m_{\Pi} (B + L) \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}} dt, \quad (17)$$

где H_0 — напор на гребнях ограждающих дамб; $H_{\text{д}}$ — напор над дамбой в конце четвертого периода.

Подъем горизонта по времени приемем линейным, тогда напор на гребнях ограждающих дамб

$$H_0 = at, \quad (18)$$

$$dt = dH_0/a, \quad (19)$$

где a — скорость подъема горизонта на пойме в четвертом периоде.

Скорость подъема горизонта на пойме определим по гидрографу уровней. Подставляем элементарное время dt из (19) в уравнение (17) и интегрируем:

$$W_1 = \frac{2m_{\Pi} (B + L) \sqrt{2g}}{5a} H_{\text{д}}^{\frac{5}{2}}. \quad (20)$$

Этот же объем воды определяем уравнением

$$W_2 = (H_{\text{д}} + 0,5iL) \Omega(h), \quad (21)$$

где i — уклон поймы; L — длина польдера.

Для нахождения напора $H_{\text{д}}$ приравняем правые части формул (20) и (21):

$$\frac{2m_{\Pi} (B + L) \sqrt{2g}}{5a} H_{\text{д}}^{\frac{5}{2}} = (H_{\text{д}} + 0,5iL) \Omega(h). \quad (22)$$

Уравнение (22) имеет одну неизвестную — напор $H_{\text{д}}$, который находим из данного уравнения подбором.

Заполнение польдера в четвертом периоде вначале будет неподтопленным, а затем станет подтопленным. Однако если без учета подтопления максимальная скорость на гребне дамб будет меньше допустимой на размыв, то более детальные расчеты в этот период делать нет необходимости, так как при подтоплении скорость только уменьшится.

При неподтопленном течении максимальную скорость на гребне в сечении с критической глубиной определяем уравнением

$$v = \varphi_{\kappa} \sqrt{2g(H_{\text{д}} - h_{\text{кр}})}. \quad (23)$$

Подъем горизонта на пойме, более высокий, чем в конце четвертого периода, будет вызывать уменьшение скоростей на гребнях ограждений в связи с ростом степени подтопления.

На спаде половодья все описанные процессы будут повторяться в обратной последовательности, и расчеты скоростей можно определять по приведенным зависимостям.

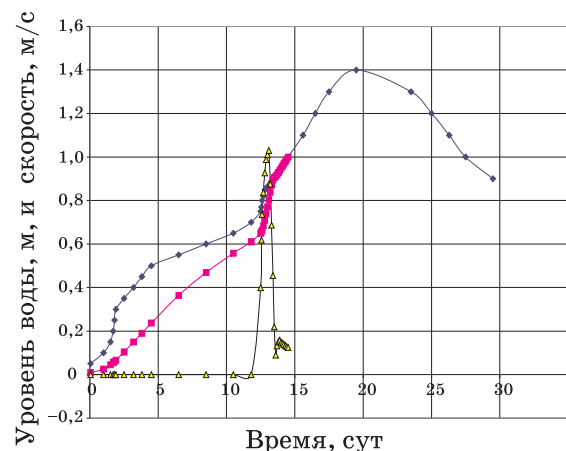
В ряде случаев при неподтопленном течении может возникать значительный перепад уровней между бьефами ограждений при сохранении меньше допустимой на размыв скорости на гребнях. Тогда требуется выполнение проверки устойчивости на размыв откосов ограждающих сооружений. Расчет скорости на откосах может быть выполнен по известной методике [4] с использованием более детальных таблиц $F(t)$ из [1].

По разработанным зависимостям в качестве примера их применения рассчитаны уровни, расходы через водовпускные сооружения и водослив-прорезь, скорость на гребне водослива-прорези для затапливаемого польдера при следующих исходных данных: площадь затапливаемого польдера $\Omega = 100$ га, водослив-прорезь расположен в нижней поперечной дамбе, высота дамбы $P_{\text{д}} = 1,0$ м, высота порога водослива-прорези $P = 0,7$ м, длина водослива-прорези $b_{\text{н}} = 30$ м, длина польдера $L = 2000$ м, ширина — $B = 500$ м, допустимая скорость на размыв $v_{\text{д}} = 0,83$ м/с.

В нижней поперечной дамбе польдера расположены водовпускные сооружения в виде труб-регуляторов с общей площадью пропускных отверстий $\omega = 1,57$ м². В половодье водовпускные сооружения к началу выхода воды к пойме полностью открыты.

Расчет динамики уровней в польдере выполнен по уравнениям (5), (11), (15), (22). Расчет скорости на гребне водослива-прорези в наиболее опасном сечении сделан при неподтопленном течении по формуле (12), при подтопленном — по формуле (16). Итоговые результаты расчета приведены на рисунке, который показывает резкое увеличение скорости на водосливе-прорези в период перехода неподтопленного течения в подтопленное. Наибольшая скорость в примере $v = 1,03$ м/с превышает допустимую скорость $v_{\text{д}} = 0,83$ м/с, поэтому в таком польдере требуется проведение мероприятий, обеспечивающих снижение максимальной скорости. В качестве мероприятий могут быть следующие: уменьшение площади польдера, увеличение пропускной способности (площади отверстий) водовпусков, увеличение длины водослива-прорези или укрепление его одеждой от размыва.

Выполненный пример расчета показал возможность применения полученных формул для оценки устойчивости к размыву гребней водосливов-прорезей



Уровни воды при затоплении польдера (—◆— на пойме; —■— в польдере) и скорость на водосливе прорези (—▲—)

затапливаемых польдеров и выбора мероприятий для его предотвращения.

При первоначальном проектировании затапливаемого польдера его элементы и параметры назначают, исходя из требований к сокращению длительности затоплений, ограничений подъема уровней при пропуске половодий, опыта проектирования аналогичных объектов. Затем делают расчет максимальной скорости на элементах оградительных сооружений по предлагаемым в данной статье способам. Сопоставляя полученные расчетом максимальные скорости с допустимыми на размыв, делают вывод об устойчивости к размыву. При несоблюдении устойчивости к размыву параметры элементов сооружений изменяют и расчеты повторяют до соблюдения требуемых условий.

Выводы

В половодье при затоплении польдера по-разному формируется скорость воды на гребнях ограждений. Максимальная скорость возникает на гребнях водосливов-прорезей во время перехода неподтопленного течения воды в подтопленное.

Для расчета динамики уровней в затапливаемых польдерах найдены формулы (5), (11), (15), (22), которые при совместном решении с зависимостью (4),

описывающей гидрограф уровней, позволяют определять глубину воды в бьефах ограждений и вычислить скорость на их гребнях.

Мероприятиями, снижающими максимальную скорость на гребнях ограждений, являются следующие: уменьшение площади польдера, увеличение пропускной способности (площади отверстий) водовпусков, увеличение длины водослива-прорези.

Ключевые слова: затапливаемый польдер, скорость, устойчивость к размыву, водослив-прорезь, дамба.

Список литературы

1. Русецкий, А. П. Затапливаемые польдеры Белорусского Полесья [Текст] / А. П. Русецкий. — Минск, 2004. — 146 с.
2. Русецкий, А. П. Экспериментальные исследования прохождения весеннего половодья через затапливаемый польдер «Беяевский» [Текст] / А. П. Русецкий, В. А. Полевой // Мелиорация и луговое хозяйство на пойменных землях : сб. науч. трудов. — Минск : БелНИИМил, 1996. — С. 23–35.
3. Русецкий, А. П. Динамика прохождения половодья через затапливаемый польдер [Текст] / А. П. Русецкий // Мелиорация переувлажненных земель. — 2006. — № 2 (56). — С. 20–28.
4. Агроскин, И. И. Гидравлика [Текст] / И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. — М., 1964. — 352 с.